512 大韓機械學會論文集 第18卷 第2號, pp.512~518, 1994

〈技術論文〉

확대관 흐름에 있어서 화염의 안정성 및 구조에 관한 연구

최병륜* · 이중성**

(1993년 8월 27일 접수)

A Study on the Flame Structure and Stabilization in a Divergent Flow

Byeong Ryun Choi* and Joong Sung Lee**

Key Words: Diffusion Combustion(확산연소), Flame(화염), Wake(후류), Bluff-Body(저항물체), Flame Stabilization(화염안정화), Divergence Flow(확대흐름), Blowoff(소염), Karman Vortex(칼만와)

Abstract

An experimental study is made on turbulent diffusion flames stabilized by a circular cylinder in a divergence flow. In this paper, stabilization characteristics and flame structure are examined by varying the divergence angle of duct and position of a circular cylinder. The fuel used is a commercial grade gaseous propane injected by two slit of rod. It is found that the positive pressure gradient greatly influences the eddy structure behind the rod. and that two different kinds of combustion patterns exist at the blowoff limit depending on the divergent angle of duct. They are distinguished by their wake structures: one associated with Karman vortex shedding, the other without it. Also, the blowoff velocity in the former is found to be higher than in the latter.

1. 서 론

난류화염을 안정화시키는 대표적인 흐름형태로서는 분류, 물체의 후류, 전단층류 등을 들 수 있다. 이 세종류 중 등단면적 관내 유동중에 난류화염을 확립하기 위해 사용되는 대표적인 흐름 형태의 하나로 물체 후류가 있다. 그런데 이 흐름의 특성은 이미 충분히 파악되어져 있고, 비(非)연소 유동장과 연소 유동장의 비교 검토로부터 확립된 난류화염의 기본특성에 관해서는 많은 결과가 보고되고 있으며, 확대흐름에 의한 정압력구배가 있는 경우에 그 압력구배의 증가로 인해 후류역(wake region)의 증대와 저항력(drag force)을 감소시킨다는 유체역학적 특성이 보고되어 있다.[1] 그리고 이 유로의 확대를 이용하여 연소기내로 유입되는 공기속도를 가능한 한 낮추면, 연료와 혼합된 혼합기의 잔존시간(residence time)이 길게되어 반응률을 높일 수 있다. 그러나 원주후류에서 형성되는 고온의 재순환영역은 열원으로 작용해 화염을 안정화시키는데, 이 고온 재순환영역이 유로의 확대로 인하여 증가한다. 따라서 온도가 저하하고,[2] 어느 한계온도 이하가 되면 반응속도가 저하되어[3] 화염안정성을 나쁘게 한다. 그런데 이러한 상관관계가 있음에도 불구하고, 그에 의한 연소장을 취급한 연구는 Yamaguchi 등[4]의 연구가 있을 뿐이다. 이런 관점에서, 혼합기의 유입속도를 유로의 확대에 의해 낮추어 그 잔존시간을 길게하고, 보염기위치는 확

*정회원, 부산대학교 기계공학과
**부산대학교 기계공학과 대학원

대중심위치를 경계로 변화시켰을 때의 화염안정성 및 그 거동을 연구하는 것은 의의가 있다고 생각되어 진다.

따라서 본 연구에서는 우선 지금까지 많은 연구가 되어온 실린더[5~12] 를 저항물체로 사용하였으며, Ito 등[13]의 연구에 이용된 방법으로 실린더에서 연료를 분출시켜 형성된 후류 확산화염을 대상으로 하였다. 그리고 확대각이 변할 수 있는 2차원 풍동을 사용해 보염기 위치 및 유로의 확대각에 따른 보염특성과 부착화염의 구조변화를 실험적으로 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 장치의 계통도와 보염기 위치 및 측정부의 상세도가 각각 Fig. 1과 Fig. 2에 나타냈다. 송풍기로부터 공급된 공기는 확대부로 흐르면서 정류부에서 Honeycomb 및 철망(40 mesh)을 통해 정류된 후 수축비가 6이고, 단면적이 50×100 mm인 노즐을 통해서 측정부로 들어간다. 노즐부는 균일한 속도를 얻기 위해 Morel[14,15]이 제안한 형상을 채용하였다. 측정부는 입구 단면형상이 50×100 mm인 직사각형이며, 유로의 확대가 −4°~+20°까지 조절 가능한 상하 각각 한 개의 철판과 그것을 평행하게 끼우고 있는 좌우 두 개의 바이콜 유리판(300 mm×100 mm×5 mm)으로 가시화 창이 나있는 철판(두께 12 mm)으로 구성되어 있다. 원주형 보염기는 좌우 벽면에 뚫어진 구멍에 의해서 지지된다.

본 실험에서는 확대 중심단면으로부터 상류 75 mm에서 측정된 피토관을 이용하여 주류속도를 측정하였으며, 측정부 입구에서 주류의 상대난류 강도는 주류속도(U)가 10 m/s일 때 약 0.8%이다. 보염기는 직경이 15 mm인 것을 사용하였다. 그리고 보염기의 위치를 확대 중심위치(x=0, y=0 mm) 및 그 상류 30, 하류 30, 60 mm(y=0 mm)로 변화시켜 실험하였다. 보염기의 구조와 치수는 Fig. 3에 나타낸 바와같이 슬릿 길이가 40 mm, 폭이 0.8 mm이며, 두 개의 슬릿을 통해서 연료를 분출시켰으며, 연료는 상용 프로판가스(C_3H_8)를 사용하였다.

연료 분출각도의 변화가 소염속도에 미치는 영향은 그 분출각이 흐름 방향에 대해 20°~135° 사이에서는 소염속도에 거의 영향을 미치지 않는 다는

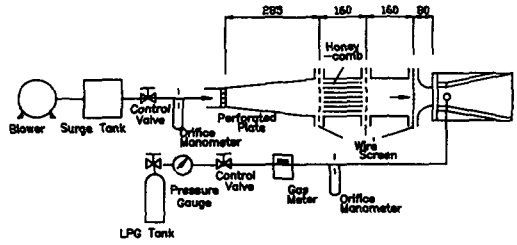


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

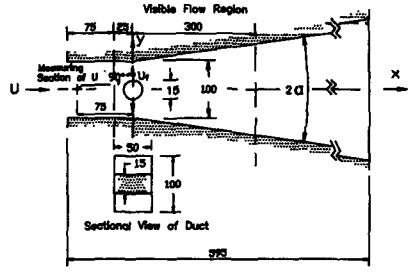


Fig. 2 Detail diagram of measurement part

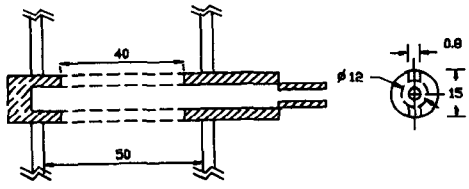


Fig. 3 The shape of flame holder

보고가 있다.[10] 그리고 105°이상이 되면, 보염기 축방향의 반응면의 폭은 하류로 갈수록 좁게되어 이차원성을 잃게 되기 때문에, 본 실험에서는 화염이 이차원성이 유지되는 각도범위 이내(약 105°미만)로서 주류방향에 직각방향으로 보염기의 슬릿상하로 연료를 분출시켰다. 이와같은 방법은 θ가 90°보다 작은 범위($\theta<90°$)의 분출방법에 비해서 예비실험을 통해서 관찰한 결과 보염기 하류부근에서 반응면이 넓고, 화염길이도 짧아 양호한 화염을 만들 수 있었기 때문이다.

화염은 공기유속 U^*(m/s) 변화와 슬릿에서 연료의 평균유속 u_f(m/s)을 설정해 형성 시켰고, 보염한계는 화염구조의 육안관찰, 직접사진 및 슈리렌사진 촬영을 통해 측정하였다. 슈리렌사진 촬영의 경우, 광축이 일직 선상에 있는 것이 아니라 오목반사경에 의해 몇번 꺾이기 때문에 꺾기는 광축에 의한 코마수차(comma aberration)를 줄이기 위해서 입사에 대한 반사각이 같도록 하였다.

주류공기가 보염기의 위치를 통과할 때의 평균유속은 U^*는 다음과 같이 하여

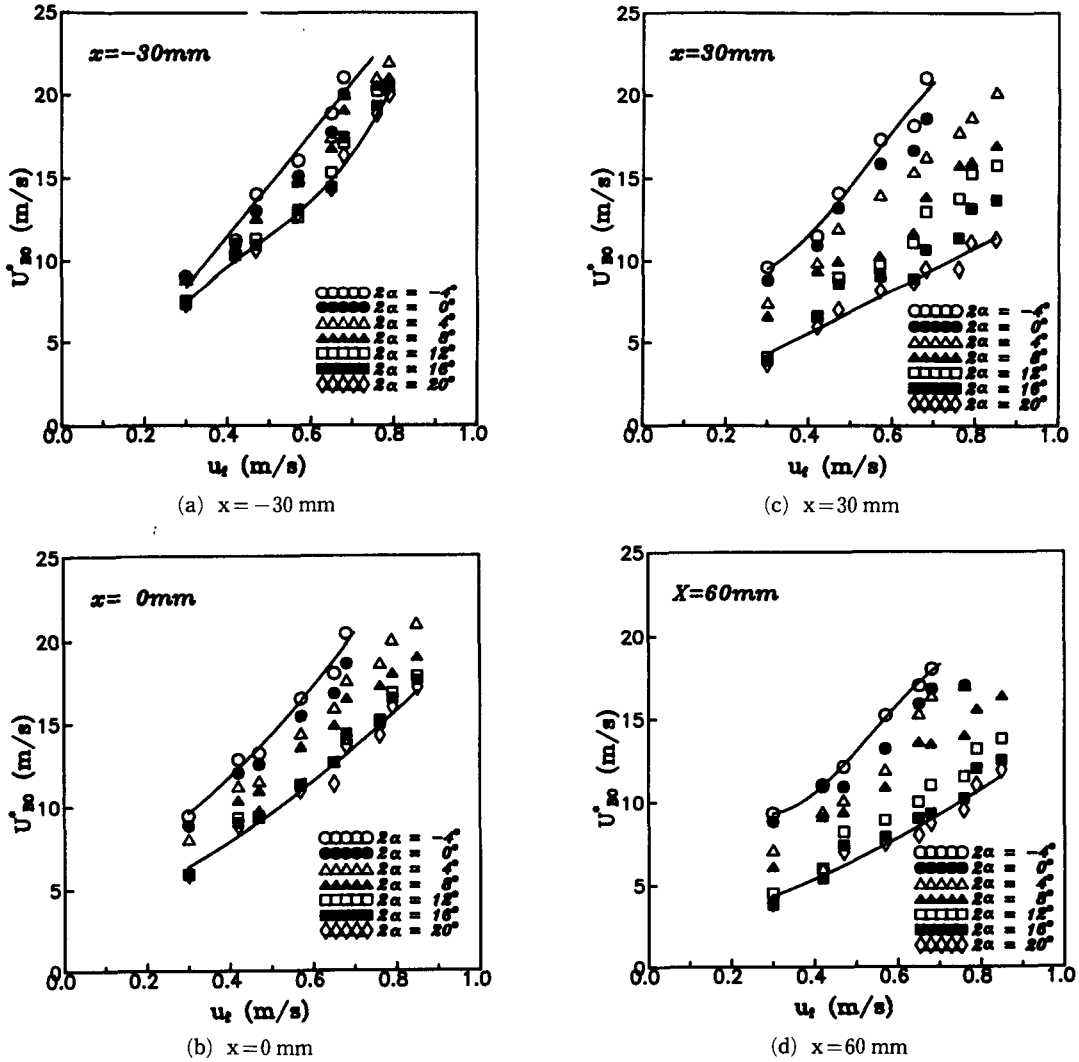
$$U^*=\frac{H}{H-d}\ U$$

주류속도를 수정하였다. 여기서 H는 연소실 유로 높이, d는 실린더 직경, 그리고 U는 확대중심단면 상류 75 mm에서 측정된 주류속도이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 보염한계

Fig. 4(a)~(d)는 보염기(d=15 mm)가 확대중심, 그 상류 30, 하류 30, 60 mm 단면에 위치한 경우의 소염속도(U^*_{BO}) 변화를 확대각 2α에 대해 나타낸 것이다. 횡축은 연료유량을 슬릿단면적으로 나눈 슬릿에서의 평균속도 u_f로 표시하였다. Fig. 4에 의하면, 보염기의 위치에 관계없이 연료속도의 증가에 따라서 소염속도가 증가하였다. 그리고 보염기가 확대 중심단면 및 그 하류방향에 근접하게 위치할 때가 그 상류나 하류에 위치할 때 보다 연료속도 및 확대각 변화에 따라 소염속도가 그림상에서 더 넓게 분포되어 있다. 즉 보염기가 확대 중심단면이나 그 하류근처에 위치할 때 소염속도는 확대각의 영향을 가장 크게 받는다는 것을 알 수



(a) x = −30 mm (c) x = 30 mm

(b) x = 0 mm (d) x = 60 mm

Fig. 4 The effects of ufel mean velocity for stability limits

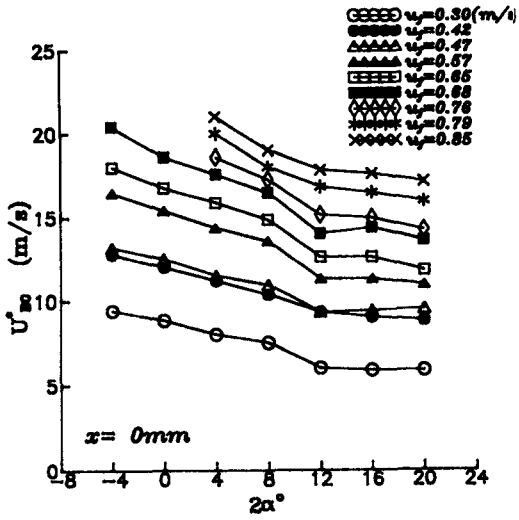


Fig. 5 The effect of divergence angles for stability limits

있었다.

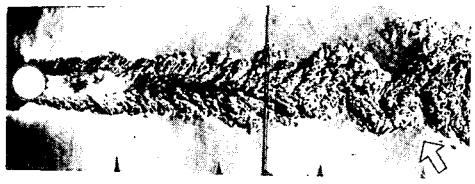
연료속도를 일정하게 유지하고 확대각 2α을 변화시켰을 때의 U^*_{BO}의 변화를 일례로, 보염기가 확대 중심단면에 위치한 경우을 Fig. 5에 표시했다. Fig. 5에서, 연료속도가 일정한 조건에서 소염속도는 확대각의 증대에 따라 감소하고, 그 감소의 비율은 확대각(2α)이 약 10°전후의 각도에서 불연속적으로 변한 다는 것을 알 수 있었다. 그런데 그 불연속대의 시작은 연료속도의 증가에 따라서 확대각이 작은 쪽으로 서서히 옮겨가고 있다. 그래서, 이 불연속대의 중심이 되는 확대각을 임계확대각[4]이라고 부르고, $2\alpha_{cr}$로 표시해 변화의 양상을 분류하면, $2\alpha<2\alpha_{cr}$의 범위(아임계역)에서는 2α의 증가에 따라 U^*_{BO}의 값은 직선적으로 감소하고, $2\alpha>2\alpha_{cr}$의 영역(초임계영역)에서는 확대각의 변화에도 불구하고 거의 일정하다. 즉 이것은 확대각이 약 10°이후에서는 확대 유로내 흐름의 separation에 의해 공기흐름의 유효단면적 변화가 거의 없기 때문에 소염속도 변화가 없다. 따라서 단순한 소염속도의 대소만에 관점을 두어 보염성을 비교하면, 아임계영역에서 형성된 화염쪽이 초임계영역에서 형성된 화염보다 우월한 연소상태를 갖는다. 본 실험의 범위에서는 확대각이 작을수록 고속류에서 보염이 가능하다.

그리고 본 논문에서 나타내지 않았지만, 보염기 위치가 확대중심 상류쪽에 위치한 경우는 확대중심에 위치한 경우와 임계확대각이 비슷하고, 보염기가 확대중심 하류쪽으로 갈수록 임계확대각은 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 어느 경우에도 소염속도 U^*_{BO}는 각각 $2\alpha_{cr}$을 경계로 해서 Fig. 5와 같은 형태로 나타났다. 그래서 이후에서는 현상의 특징을 이해하는데 좋은 조건으로 확대각의 영향이 가장 잘 나타난다고 생각되는 확대 중심 단면에 위치한 보염기의 흐름 조건을 대상으로 해서, 확대각을 증대시켰을 때의 원주후류의 와구조와 부착화염과의 대응관계를 순간 슈리렌촬영에 의한 관찰을 통해 파악해, 그 보염특성의 변화를 조사하였다.

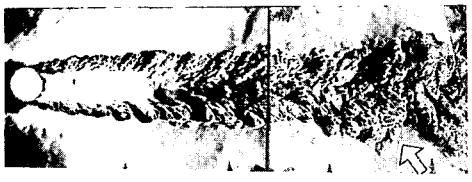
3.2 연소상태의 천이

Fig. 6은 소염근방 상태에 있는 화염의 순간 슈리렌사진이다. 연료속도(u_f)은 0.68 m/s이고, 보염기 위치는 확대중심 단면($x=0$, $y=0$ mm)이다. 확대각 및 주류속도가 Fig. 6(a)는 $(2\alpha, U^*)=(0°, 18.2\ \text{m/s})$, Fig. 6(b)는 $(2\alpha, U^*)=(4°, 17\ \text{m/s})$이고, Fig. 6(c)는 $(2\alpha, U^*)=(0°, 14.0\ \text{m/s})$이다. Fig. 6에 의하면, 원주후류에 화염을 안정화시키는 경우에, 평행기류 및 확대각이 4°일때는 흐름장에 칼만와열(Fig. 6(a), (b)에 화살표로 표시)이 존재한다. 그런데 이 Karman Vortex가 화염안정화 영역으로부터 멀리 떨어져서 나타나고 있지만, 화살표로 표시한 부분과 같이 충분히 발달된 Karman Vortex의 전(前)영역 즉 화염안정화 영역에서는 large scale eddy속에 small scale eddy가 포함되어 함께 거동하며서, 이 eddy들이 하류에서 더 미세하게 쪼개지면서 Karman Vortex로 진행되었다.

그러나 확대유로각(2α)이 16°인 경우(Fig. 6(c))는, 화염안정화 영역에서 주로 small scale eddy로 구성되어 거동하고, large scale eddy는 거의 나타나지 않았다. 그런데 이 Karman Vortex가 화염안정화 영역에서 나타나는 large scale eddy 속에 small scale eddy가 포함되어 함께 거동하고, 다시 더 작은 scale eddy로 쪼개지면서 후류에서 나타나는 현상이지만, 여기서는 전체적으로 현상을 나타내는데 뚜렷한 구분이 되므로 Karman Vortex로서 화염안정성을 구분했다. 이와 같이 확대각의 크기에 의해 칼만와열이 발생·소멸되는 현상은 확대흐름에 있어서 큰 특징의 하나로 생각된다. 이와 같은 요인은 확대관 내부흐름에서 벽면 접촉저항에 의해서 생기는 손실(friction loss)과 경계층의 이탈에 의해서 생기는 손실(stall loss)이 있으며, 이



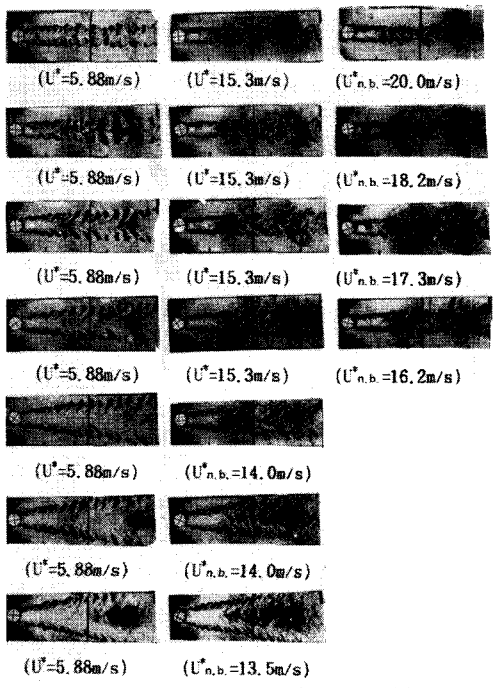
(a) Parallel duct flow ($2\alpha=0°$, $U^*=18.2$ m/s)



(b) Divergence duct flow ($2\alpha=4°$, $U^*=17.3$ m/s)

(c) Divergence duct flow ($2\alpha=16°$, $U^*=14$ m/s)

Fig. 5 The schlieren photographs for near blowout air velocity



n.b. : near blowout

(x=0mm, u_f=0.68m/s)

Fig. 7 The transition of combustion pattern for air velocity and divergence angles

확대각 증대에 따라 접촉저항은 감소하나 Stall손실은 증가해 어느 각도를 임계각으로 해서 총손실(total loss)이 가장 낮게 되는데, 그 각은 일반적으로 7°~12°사이로 알려져 있다.[16] 이와 같은 손실 들의 상관관계에 의해서 본 실험에서도 Fig. 6 (a), (b)와 같이 연소형태의 천이가 나타났다. 따라서 본 연구에서는 간단히 칼만와 형성을 동반하는 연소형태를 칼만와연소, 칼만와 형성을 동반하지 않는 경우를 비칼만 와연소로 규정하여 구별했다.

더욱 상세한 연소특성을 조사하기 위하여, 주류속도(U^*)를 5.88, 15.3 m/s 및 소염한계근방으로 설정한 경우의 화염의 순간 슈리렌사진을 촬영하고, 소염직전의 화염거동을 고찰했다. Fig. 7은 보염기위치를 확대 중심단면에 놓고, 연료속도(u_f)을 0.68 m/s로 하고, 확대각(2α)을 −4°~20° 사이에 4°씩 변화시킨 경우의 화염의 순간 슈리렌사진이다. 또 Fig. 8에 Fig. 7의 순간 슈리렌사진 관찰을 통한 판별결과와 소염직전의 연소상태의 결과를 종합해서 나타내었다. 또한 연소상태가 칼만와연소가 된다고 예상되는 영역을 점을 찍어 표시했다.

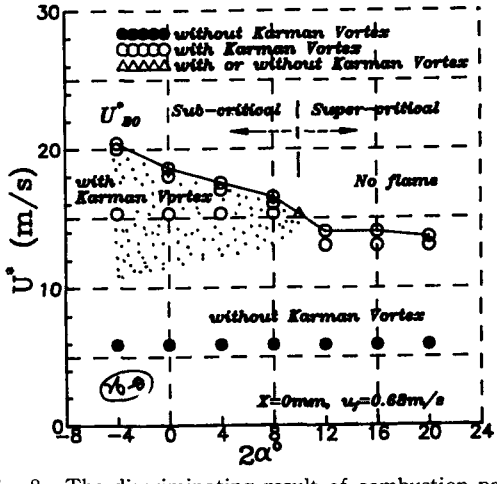


Fig. 8 The discriminating result of combustion pattern

Fig. 7 및 Fig. 8에서, 아임계영역(−4°≦2α≦8°)에서 형성된 화염이 5.88 m/s에서 15.3 m/s로의 주류속도의 증가에 따라 비칼만와연소(●표시)로부터 칼만와연소(○표시)로 천이하고, 초임계영역(12°≦2α≦20°)에서는 연소형태의 천이는 없고, 소염근방

의 주류속도까지 비칼만와연소가 유지된다는 것을 알 수 있었다. 더욱이 Fig. 8로부터 소염시의 연소형태가 $2\alpha<10°$의 범위에서는 칼만와연소(○표시), $2\alpha>10°$의 범위에서는 비칼만와연소(●표시)로 되며, 그 경계가 되는 각도(2α)는 약 10°로 앞에서 기술한 임계확대각 $2\alpha_{cr}$와 같다는 것을 알 수 있다. 이것으로부터, 아임계역·초임계역을 결정하는 주요인의 하나가 소염시의 연소형태의 차이에 있고, 보염성의 양부(良否)는 소염시의 연소형태에 크게 의존한다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 원주로부터 연료를 분출하는 보염 방식에서는 아임계영역에서 화염을 안정화시키고, 비칼만와연소로부터 칼만와연소로의 천이형태를 이용하는 것이 보다 높은 속도까지 보염이 가능하다는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

확대각이 변하는 이차원 유로에 원주를 설치해, 흐름방향에 직각방향으로 연료를 분출하여 난류확산화염을 형성시켜, 그 화염의 안정성 및 그 보염특성에 미치는 주류 압력구배의 영향을 실험적으로 조사하여 얻어진 결과를 요약하면, 다음과 같다.

(1) 확대각이 보염기 위치에 따라 소염속도에 미치는 영향은 보염기의 위치가 확대중심 위치로부터 상류방향이나 하류방향(60 mm)보다는 확대중심 위치 및 그 하류방향에 근접하게 위치할수록 더 크게 영향을 받는다.

(2) 확대각의 증대에 따라 아임계영역($2\alpha<10°$)에서의 소염속도는 거의 선형적으로 감소하였다. 그러나 확대각이 약 10°이후, 즉 초임계영역에서는 확대유로내 흐름의 separation에 의해 공기흐름의 유효 단면적변화가 거의 없기 때문에 소염속도 변화가 없었다.

(3) 아임계역에서 주류속도를 증가시키면 칼만와 방출을 동반하지 않는 비칼만와연소로부터 칼만와 방출을 동반하는 칼만와연소로 천이가 생긴다. 그리고 초임계영역에서는 연소의 천이가 없이 비칼만와연소의 형태로 천이한다. 즉, 아임계영역과 초임계영역에서는 화염이 소염될 때 연소형태가 다르다.

참고문헌

(1) Shigeki Yamaguchi, 1990. "Cold Flame Structure and Stabilization in a Divergent Flow," *JSME* (B), Vol. 56-523, pp. 803~808.

(2) Choi. and Lee., 1993, "Characteristic of Turbulent Diffusion Wake Flame Behind Bluff Body with Fuel Injection in a Divergence Flow," *Proceedings of the KSME Autumn Annual Meeting* '93, Vol. II, pp. 408~414.

(3) Longwell J.P. and Weiss M.A., 1953, *Industry Engineering Chemi.*, Vol. 1629, pp. 45~48.

(4) Yojiro Ishino, 1990, "Flame Structure and Stabilization in a Divergent Flow," *JSME* (B), Vol. 56, No. 528, pp. 2469~2475.

(5) Davies. T. W. and Beer. J.M., 1970, "Flow in the Wake of Bluff-Body Flame Stabilizations," *Proc. 13th Symp. (Int.) Combust.*, The Combustion Institute, pp. 631~637.

(6) Hiroshi Tsuji and Tatsuo Okano, 1962, "Flame Stabilization by a Bluff-body Flameholder with Gas Ejection," Aero. Res. Inst., Univ. Tokyo, Report, Vol. 3, No. 1, pp. 78~96.

(7) Shigeki Yamaguchi, 1985, *Structure and Blow-Off Mechanism of Rod-Stabilized Premixed Flame*, Vol. 62. No.1, pp. 31~41.

(8) Wright F.H., 1958, "Bluff-Body Flame Stabilization: Blockage Effects," *Combustion and Flame*, Vol. 3, pp. 319~337.

(9) Williams G.C., and C.W Shipman, 1953, "Some Properties of Rod-Stabilized Flames of Homogeneous Gas Mixtures," *Fourth Intern. Symp. on Combustion*, Williams and Wilkins, Baltimore, pp. 733~742.

(10) Pan J.C. et. al, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power Jan.* 1992, Vol. 114~33

(11) Nisholson H.M., and Field J.P., 1949, "Some Experimental Techniques for the Investigation of the Mechanism of Flame Stabilization in the Wakes of Bluff Bodies," *Third Symp. on Combustion*, Williams and Wilkins, Baltimore, pp. 44~66.

(12) Edward E. Zukoski and Frank E. Marble, 1955, "Experiments Concerning the Mechanism of Flame Blowoff from Bluff Bodies," *Proceeding Gas Dynamics Symp. Northwestern University*, pp. 205~210.

(13) Kenichi Ito, 1977, "Stabilization Mechanism of Turbulent Diffusion Wake Flame Behind Bluff Bodies with Fuel Injection," *JSME* (B), Vol. 83, No. 0123, pp. 1144~1151.

(14) Morel, T., 1975, "Comprehensive Design of Axisymmetric Wind Tunnel Contractions," *Journal of Fluid Engineering*, pp. 225~233.

(15) Tulapurkara, E.G. and Bhalla, VV.K. 1988, "Experimental Investigation of Morel's Method for Wind Tunnel Contractions," *Journal of Fluid Engineering*, Vol. 110, pp. 45~47.

(16) Arthur W. Lefebvre, 1983, *Gas Turbine Combustion*, McGraw-hill, New York, pp. 77-88.